

На примере свай по ул. Р. Люксембург было проведено сравнение грунтоцементной и аналогичной буронабивной сваи (см. таблицу).

Таким образом, грунтоцементные сваи требуют больших затрат материалов, чем буронабивные. К другим недостаткам относятся трудность армирования и отсутствие методики расчета.

К основным преимуществам технологии относятся следующие: высокая производительность, простота, экономичность, возможность работы в стесненных условиях (вблизи существующих зданий, в подвалах), отсутствие негативных ударных воздействий.

Перспективность струйной технологии закрепления грунтов заключается в возможности полной механизации работ, экологической чистоте, возможности ведения работ в стесненных условиях, сокращении сроков и конечной стоимости строительства.

Отсутствие нормативной документации по расчету Jet свай, несмотря на все преимущества струйной технологии, приводит к снижению темпов внедрения технологии закрепления грунтов «jet grouting» в строительстве. Нашей первоочередной задачей является разработка метода расчета Jet свай, который бы учитывал особенности армирования и материала - грунтобетона.

Библиографический список

1. <http://www.jet-grouting.ru/activities/consolidation/>
2. <http://www.jet-grouting.ru/publications/>
3. <http://new-ground.ru/main/index.html?id=4&eid=1>
4. http://geo-soft.ru/articles/page_1.html
5. http://geo-soft.ru/articles/page_2.html
6. <http://www.drilltech.ru/fund-technologies/jet-grouting-technology/>

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

М.Ю. АНАНЬИН, Ю.С. ВЕДИЩЕВА

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

В последние годы задача энергосбережения становится все более актуальной, в том числе и в строительной области. Энергосбережение в строительстве – это комплекс мероприятий, направленных на снижение потерь тепла во время эксплуатации здания. Известно, что большую часть тепловой энергии здание теряет через окна и вентиляцию, однако и через глухие участки стен и покрытий уходит гораздо больше тепла, чем зачастую принимается при теплотехнических расчетах наружного ограждения. Причиной этого, как правило, является наличие теплопроводных включений, неизбежных в некоторых видах стеновых ограждений.

Например, в современных сэндвич-панелях основными «мостиками холода» являются болты или самонарезающие винты, при помощи которых панели крепятся к каркасу здания. Сама панель, вследствие такого крепления, является термически неоднородной конструкцией. Таким образом, является актуальной задача оценки влияния термических неоднородностей на теплотехнические свойства наружных ограждающих конструкций.

Сэндвич-панель представляет собой трехслойную конструкцию, в которой между обшивками заключен минераловатный либо пенополиуретановый или пенополистирольный утеплитель. По существующей технологии заводы-изготовители производят панели шириной 1000 мм и 1190 мм и длиной до 9000 мм с плоскими либо профилированными металлическими обшивками. Для крепления сэндвич-панелей к каркасу на практике применяются самонарезающие винты диаметром от 5,5 мм из стали марок 1022 и 1018 (российский аналог 20Г, 22К, 15) или болты М8. Для производства металлического листа сэндвич-панелей заводами-изготовителями используется сталь марок 08Ю, 08пс, 08кп.

Для предварительного выяснения влияния теплопроводных включений проведено численное исследование по методу полного многофакторного анализа [1]. Рассматривалась панель шириной 1000 мм и длиной 6000 мм с плоскими металлическими обшивками, толщиной 0,5 мм. Толщина утеплителя 150 мм (рис. 1). В качестве расчетной модели был принят

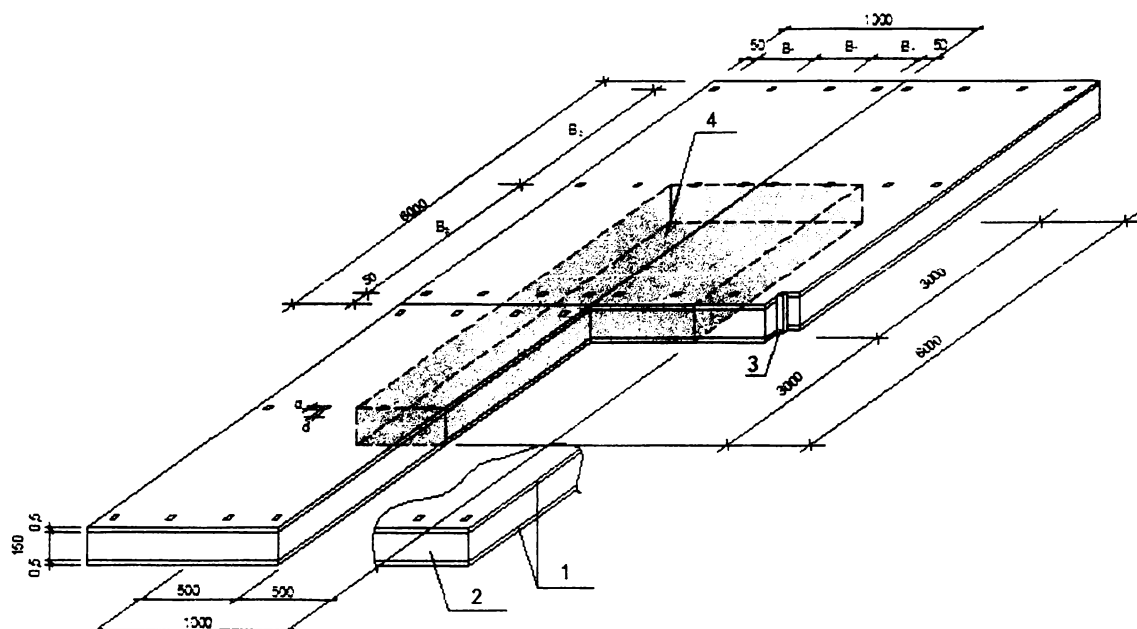


Рис.1. Участок глухой стены на стыке четырех сэндвич-панелей: 1 – верхняя и нижняя обшивки сэндвич-панели; 2 – утеплитель; 3 – самонарезающий винт; 4 – фрагмент стенового ограждения, принятый для исследования

участок глухой стены на стыке четырех панелей (рис. 1), ширина участка 1000 мм, длина участка 6000 мм.

При проведении численного эксперимента приняты диаметры самонарезающих винтов от 5 мм до 8 мм, коэффициент теплопроводности принят 44,5 Вт/(м·К), удельная теплоемкость 482 Дж/(кг·К), плотность 7871 кг/м³. Для упрощения сетки и экономии ресурсов, самонарезающие винты моделировались прямоугольными в сечении, резьба самонарезающих винтов не моделировалась (см. рис. 1). Материал обшивок имеет следующие характеристики: коэффициент теплопроводности 58 Вт/(м·К), удельная теплоемкость 482 Дж/(кг·К), плотность 7871 кг/м³. Утеплитель панели рассматривался как однородный материал с варьируемым коэффициентом теплопроводности, удельной теплоемкостью и плотностью, принятыми для минеральной ваты, соответственно 0,84 Дж/(кг·К) и 110 кг/м³.

Исследование выполнялось в конечно-элементном программном комплексе ANSYS. Для моделирования задачи использовался элемент SOLID 70, модель строилась при помощи булевых операций. Конечно-элементная сетка принималась возможно более мелкой исходя из возможностей компьютера и варьировалась от размера элемента сетки 0,05 м до 0,02 м формы элементов Tet+Free, и размера элемента 0,01 м формы Hex+Sweep. Форма элементов сетки Hex+Sweep выбиралась с учетом удобства последующей обработки результатов расчета в программе Excel.

Граничным условием принято convection on areas (конвекция, приложенная по плоскости), для наружной обшивки film coefficient (коэффициент теплоотдачи) 23 Вт/(м²·К), bulk temperature (температура окружающей среды) 238 К, для внутренней обшивки film coefficient (коэффициент теплоотдачи) 8,7 Вт/(м²·К), bulk temperature (температура окружающей среды) 293 К. Результаты получены в графической (рис. 2) и табличной формах с последующей обработкой в программе Excel.

В начале исследования была произведена оценка значимости факторов влияния. В результате при планировании многофакторного эксперимента в качестве варьируемых параметров приняты диаметр самонарезающих винтов (d), продольный ($B1$) и поперечный ($B2$) шаг самонарезающих винтов, коэффициент теплопроводности утеплителя (λ_{yt}) (см. рис. 1). Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 1.

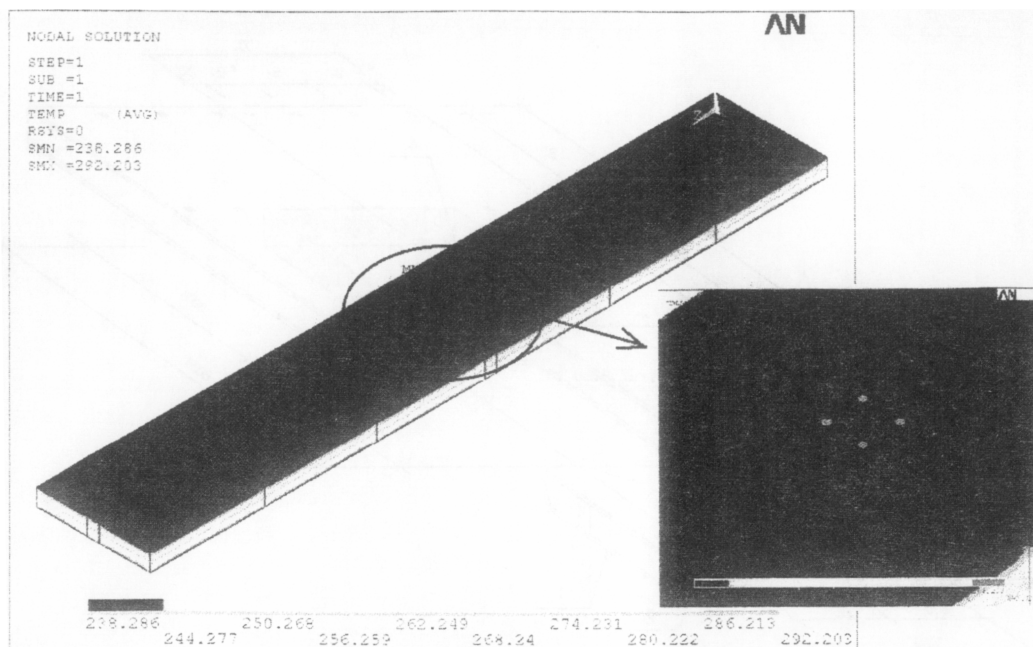


Рис.2. Графическое представление результатов исследования в программе ANSYS

Таблица 1

Матрица планирования $y = 2^4$

	-1	0	+1	λ
$X_1 = d$	5,0	6,5	8,0	1,5
$X_2 = B_1$	200	350	500	150
$X_3 = B_2$	1000	3500	6000	2500
$X_4 = \lambda_T$	0,02	0,035	0,05	0,015

При моделировании учитывалась температура наружного воздуха $t_{ext} = -35^\circ\text{C} = 238\text{ K}$, температура внутреннего воздуха принята $t_{int} = 20^\circ\text{C} = 290\text{ K}$. Толщина утеплителя и температуры наружного и внутреннего воздуха не варьировались как взаимосвязанные параметры. Толщина и форма обшивок, а так же коэффициент теплопроводности материала обшивок не варьировались как малозначимые параметры.

При расчете вычислялось температурное поле конструкции, результаты обрабатывались в программе Excel: из всех полученных при температурном расчете значений выделялись значения температуры на наружной (τ_{ext}) и внутренней (τ_{int}) поверхности конструкции, вычислялись средние значения τ_{ext} и τ_{int} соответственно. Далее вычислялись плотности теплового потока в направлении к наружной поверхности конструкции (q_{ext}) и к внутренней поверхности (q_{int}) по следующим формулам [2]:

$$q_{ext} = \alpha_{ext} (\tau_{ext} - t_{ext}), \quad (1)$$

$$q_{int} = \alpha_{int} (t_{int} - \tau_{int}), \quad (2)$$

где α_{ext} и α_{int} – коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхностей ограждающей конструкции,

t_{ext} и t_{int} – наружная и внутренняя температуры воздуха.

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции вычислялось по формулам [2]:

$$R_{ext} = \frac{t_{int} - t_{ext}}{q_{ext}}, \quad (3)$$

$$R_{int} = \frac{t_{int} - t_{ext}}{q_{int}}. \quad (4)$$

Коэффициент теплотехнической однородности конструкции вычислялся следующим образом [3]:

$$r_{ext} = \frac{R_{ext}}{R}, \quad (5)$$

$$r_{int} = \frac{R_{int}}{R}, \quad (6)$$

где R – термическое сопротивление конструкции без теплопроводных включений.

Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты многофакторного эксперимента

№ п/п	d, мм	B ₁ , мм	B ₂ , мм	λ _{гт} , Вт/(м·К)	R _{ext} ^r , (м ² ·К)/Вт	R _{int} ^r , (м ² ·К)/Вт	r _{ext}	r _{int}	Размеры и форма сетки
1	5	200	1000	0,02	3,072	3,535	0,401	0,461	0,05 м Tet+Free
2	5	200	1000	0,05	1,992	2,172	0,631	0,688	0,05 м Tet+Free
3	5	500	1000	0,02	4,584	4,993	0,599	0,652	0,03 м Tet+Free
4	5	500	1000	0,05	2,497	2,615	0,791	0,828	0,03 м Tet+Free
5	5	200	6000	0,02	6,165	6,216	0,805	0,812	0,01 м Hex+Sweep
6	5	200	6000	0,05	2,871	2,900	0,909	0,918	0,01 м Hex+Sweep
7	5	500	6000	0,02	6,919	6,915	0,903	0,903	0,01 м Hex+Sweep
8	5	500	6000	0,05	3,015	3,038	0,955	0,962	0,01 м Hex+Sweep
9	8	200	1000	0,02	3,362	3,579	0,439	0,467	0,02 м Tet+Free
10	8	200	1000	0,05	2,101	2,185	0,665	0,692	0,02 м Tet+Free
11	8	500	1000	0,02	4,470	4,727	0,584	0,617	0,02 м Tet+Free
12	8	500	1000	0,05	2,461	2,543	0,779	0,805	0,02 м Tet+Free
13	8	200	6000	0,02	6,101	6,082	0,797	0,794	0,01 м Hex+Sweep
14	8	200	6000	0,05	2,856	2,873	0,904	0,910	0,01 м Hex+Sweep
15	8	500	6000	0,02	7,422	7,382	0,969	0,963	0,01 м Hex+Sweep
16	8	500	6000	0,05	3,117	3,089	0,987	0,978	0,01 м Hex+Sweep

Результаты исследования (на примере эксперимента №11 (см. табл. 2)) в графической форме представлены на рис. 3.

На основании результатов исследования получено уравнение регрессии для расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружного ограждения на базе металлопрофилей на участке глухой стены:

$$R_{ext}^r = -0,528680251 + 0,3579284743 \cdot d + 12,76688666 \cdot 10^{-3} \cdot B_1 + 1,54007044 \cdot 10^{-3} \cdot B_2 + 30,35558668 \cdot \lambda - 0,961494221 \cdot 10^{-3} \cdot d \cdot B_1 - 97,9823 \cdot 10^{-6} \cdot d \cdot B_2 - 5,49075 \cdot d \cdot \lambda - 2,286 \cdot 10^{-6} \cdot B_1 \cdot B_2 - 194,920977 \cdot 10^{-3} \cdot B_1 \cdot \lambda - 24,33156355 \cdot 10^{-3} \cdot B_2 \cdot \lambda + 320,8 \cdot 10^{-9} \cdot d \cdot B_1 \cdot B_2 + 14,8426666 \cdot 10^{-3} \cdot d \cdot B_1 \cdot \lambda + 1,561422 \cdot 10^{-3} \cdot d \cdot B_2 \cdot \lambda + 35,079 \cdot 10^{-6} \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot \lambda - 5,25155 \cdot 10^{-6} \cdot d \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot \lambda. \quad (7)$$

По результатам численного эксперимента были выявлены следующие закономерности:

1) при одинаковом шаге теплопроводных включений ($B_{1i} = B_{1j}$ и $B_{2i} = B_{2j}$) и одинаковом коэффициенте теплопередачи утеплителя ($\lambda_i = \lambda_j$) сопротивление теплопередачи наружной ограждающей конструкции больше при большом диаметре теплопроводного включения, т.е. $R_i > R_j$ при $d_i > d_j$. Возможным объяснением этого может являться то, что сопротивление теплопередачи конструкции считается по тепловому полю на внешней поверхности обшивки. Так как самонарезающий винт является «мостиком холода», то температура на его поверхности выше температуры окружающей его наружной обшивки, поскольку он

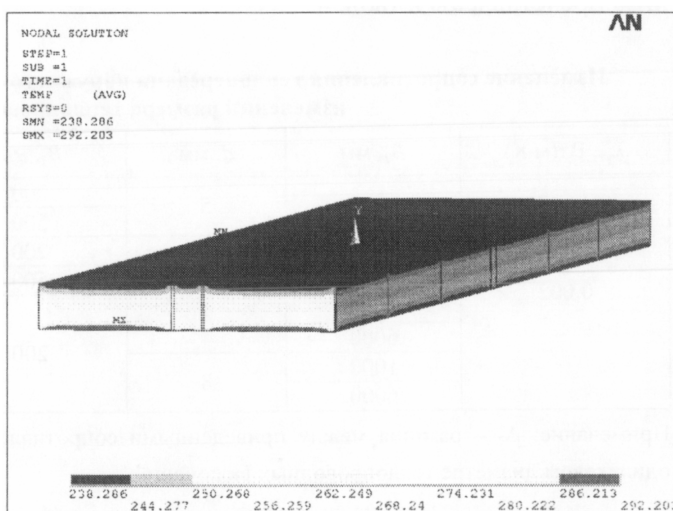


Рис.3. Температурное поле конструкции для эксперимента №11 (см. табл. 2)

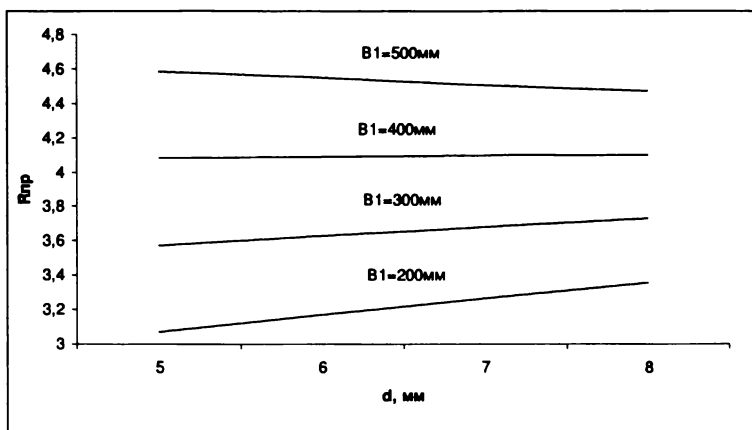


Рис.4. График зависимости приведенного термического сопротивления конструкции от диаметра теплопроводного включения при различном поперечном шаге самонарезающих винтов

контактирует по толщине панели с утеплителем, коэффициент теплопроводности которого много меньше коэффициента теплопроводности самонарезающего винта. То есть на поверхности, по которой вычисляется тепловое поле, размеры более теплых участков больше, а, следовательно, и средняя температура больше. Данное явление требует дальнейшего изучения и экспериментальной проверки;

2) по результатам численного эксперимента (табл. 2)

видно, что $R'_{ext} = R'_{int}$, в то время как теоретически они должны быть одинаковыми по величине. На результаты вычисления приведенного термического сопротивления сэндвич-панели влияет размер элементов сетки. Чем меньше элементы сетки, тем ближе соответствующие значения сопротивления теплопередачи друг к другу, а, следовательно, ближе к истинному значению. Так, при расчете фрагмента глухой стены на стыке сэндвич-панелей длиной 3 м, шириной 1 м, с утеплителем толщиной 0,15 м, $\lambda_{ут} = 0,045$ Вт/(м·°К), обшивками толщиной 0,5 мм, $\lambda_{об} = 58$ Вт/(м·К), самонарезающими винтами диаметром 12 мм, поперечным шагом крепления 300 мм, продольным шагом крепления 1500 мм $\lambda_{кр} = 44,5$ Вт/(м·К), были получены результаты, представленные в табл. 3, при соответствующем размере элементов сетки:

Таблица 3

Влияние размера сетки на точность результатов

Сетка	$R'_{ext}, (м^2 \cdot К)/Вт$	$R'_{int}, (м^2 \cdot К)/Вт$	$\Delta_1 = \frac{R'_{ext} - R'_{int}}{R'_{ext}}$
0,008 м Hex+Sweep	2,494981	2,477032	0,7 %
0,01 м Hex+Sweep	3,344606	2,29727	2,1 %

Рациональная величина разбивки на конечные элементы с позиции точности результатов расчета и их трудоемкости требует дополнительных исследований.

3) с увеличением размера теплопроводных включений, разница между сопротивлениями теплопередачи легких наружных ограждающих конструкций на базе металлопрофилей при разном шаге теплопроводных включений снижается (рис. 4, рис. 5). Результаты анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение сопротивления теплопередачи наружного ограждения на базе металлопрофиля при изменении размера теплопроводных включений

$\lambda_{\text{гт}}, \text{Вт}(\text{м} \cdot \text{К})$	$B_2, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$B_1, \text{мм}$	$R_{\text{ext}}^r, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$	$\Delta_2, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$
0,002	1000	5	200	3,07108	1,5098
			500	4,58088	
		8	200	3,36001	1,10414
			500	4,46424	
	1000	5	200	3,07108	3,08842
	6000			6,1595	
	1000	8		3,36001	2,72905
	6000			6,08906	

Примечание: Δ_2 – разница между приведенными сопротивлениями теплопередачи R'_{ext} при разном шаге и одинаковом диаметре теплопроводных включений

4) величины коэффициентов теплотехнической однородности, учитывающих влияния самонарезающих винтов, колеблются в диапазоне от 0,401 до 0,987, что является существенным фактором, требующим учета.

Полученные результаты являются предварительными и требуется их уточнение в дальнейших исследованиях с учетом этих и других факторов влияния. При этом проведенные исследования позволяют получить результаты, пригодные для практического применения.

К примеру, для глухой стены из сэндвич-панелей с плоскими металлическими обшивками толщиной 0,5 мм коэффициентом теплопроводности $\lambda_{об} = 58 \text{ Вт(м·К)}$, минераловатным утеплителем толщиной 150 мм, коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ут} = 0,045 \text{ Вт(м·К)}$, прикрепленной к каркасу здания с помощью самонарезающих винтов диаметром $d = 6,3 \text{ мм}$, поперечным шагом крепления $B_1 = 500 \text{ мм}$, продольным шагом крепления $B_2 = 1500 \text{ мм}$, приведенное сопротивление теплопередачи, посчитанное по формуле (7) будет равно $R_{ext}^r = 2,88314742 \text{ (м}^2\text{·К)/Вт}$, сопротивление теплопередачи той же панели без теплопроводных включений, посчитанное по формулам из [2, 3] равно $R = 3,491771364 \text{ (м}^2\text{·К)/Вт}$, тогда коэффициент теплотехнической однородности по формуле (5), приведенной в [3] $r = 0,83$.

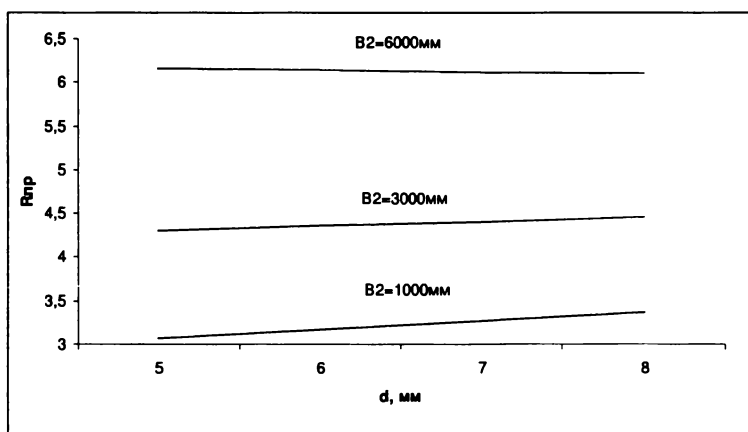


Рис.5. График зависимости приведенного термического сопротивления конструкции от диаметра теплопроводного включения при различном продольном шаге самонарезающих винтов

Библиографический список

1. Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов - Л.: Изд-во Ленинград. гос. ун-та, 1975. - 78 с.: ил. - Библиогр.: с. 77. - 0.31.
2. СНиП II-3-79* Строительная теплотехника
3. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий